

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 5 月 25 日現在

機関番号：12701
 研究種目：基盤研究（C）
 研究期間：2009～2011
 課題番号：21540297
 研究課題名（和文）スペース実験用カロリメータの大ダイナミックレンジ読み出しシステムの実証化研究
 研究課題名（英文）Empirical Research Concerning a Wide Dynamic Range Read-Out System for a Calorimeter for a Space Experiment
 研究代表者
 片寄 祐作（KATAYOSE YUSAKU）
 横浜国立大学・工学研究院・准教授
 研究者番号：90323930

研究成果の概要（和文）：高エネルギー宇宙天体現象の研究のため、本課題では、エネルギーが数十ギガ電子ボルトからテラ電子ボルトを超える高エネルギー電子、ガンマ線、原子核宇宙線の高精度直接観測を目的とした全吸収型カロリメータの信号読み出しシステム研究を行った。このため、1) アバランシェフォトダイオード（APD）とPN接合フォトダイオードを1つのセラミック基板に実装したデュアルフォトダイオード光センサーの評価、2) 超低ノイズ、ワイドレンジハイブリッドICを用いた信号読み出し回路開発、3) 多チャンネル、低消費電力を実現するためのワイドレンジASIC開発を実施した。

研究成果の概要（英文）：A signal read-out system for a calorimeter for high energy cosmic ray observation was studied. The research study involved the following three studies. 1) The performance of a dual photo-diode, which has an APD and a PN junction photo-diode in one ceramic substrate, was evaluated as a photo-sensor for the calorimeter. 2) The performance of a wide range read-out circuit using a hybrid IC was evaluated for the CALET experiment. 3) A front-end application specified integrated circuit (ASIC) was developed with a wide dynamic range amplifier to read out signals from a photo-sensor like a photodiode.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,500,000	450,000	1,950,000
2010年度	1,500,000	450,000	1,950,000
2011年度	200,000	60,000	260,000
年度			
年度			
総計	3,200,000	960,000	4,160,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：宇宙線（実験）、カロリメータ、フロントエンド回路、ASIC、ハイブリッドIC、フォトダイオード、結晶シンチレータ

1. 研究開始当初の背景

宇宙線の加速・伝播機構を解明するためには広範囲なエネルギー領域で様々な粒子を精度よく測定することが必要である。電子の加速機構については衛星でのX線、地上での

テラ電子ボルト（TeV）ガンマ線による観測によって明らかになりつつあるが、これらのガンマ線、X線は加速電子から作られたものであり加速機構を説明するにはその源の磁場などに仮定を必要とする。より確かな情報

を得るためには超新星からの TeV 電子を直接観測することが重要である。一方、TeV 領域の原子核や電子観測ではエネルギーに伴う強度減少と電子観測ではバックグラウンド陽子の相対的增加が問題となる。高精度電子観測には強力な陽子除去能力をもつ装置が必要である。現在 TeV 以下の宇宙線直接測定は、気球や衛星に搭載された比例計数管やチェレンコフカウンター、超伝導マグネットによるスペクトロメータ等によって行われている。これまでに気球による TeV 領域電子観測に成功した、エマルジョンチェンバーには、時間分解能がなく年単位の長時間観測が行えないなどの欠点がある。また、スペクトロメータを用いて TeV 宇宙線を観測するには 1 テスラ以上のマグネットが必要となり実現は難しい。従って、十分な統計量が得られる長時間観測が可能な装置としては粒子選別のためのシャワーイメージング機能を備えたカロリメータがほぼ唯一の装置である。

2. 研究の目的

2014 年に国際宇宙スーションに搭載される宇宙線電子、ガンマ線、原子核観測装置 CALET (Calorimetric Electron Telescope) では TeV 領域観測のため全吸収型カロリメータが使われる。カロリメータはタングステン酸鉛結晶シンチレータ (PWO) が 192 本使用され、1 本のシンチレータ (1.9cm×2.0cm×32cm) によってエネルギーが 0.5MIPs (Minimum Ionization Particle) から最大エネルギーで 10⁶MIPs までの測定が行われる。つまり約 6 桁以上のダイナミックレンジのエネルギー測定が求められる。本課題ではこのような高エネルギー宇宙線観測を目的とした全吸収型カロリメータのための信号読み出しシステムの実証化研究を行った。

[光センサー開発] 検出器内で失うエネルギーは結晶シンチレータにより光に変換されるため、広いダイナミックレンジの光センサーが必要となる。このため、大きさ、増幅率の異なる 2 種類のフォトダイオードを用いて 6 桁以上のダイナミックレンジでの信号読み出しシステムを開発した。CALET 観測実験は宇宙環境下で 2 年から 5 年度程度の長期にわたり行われるため、センサーについて環境放射線の影響を明らかにする必要がある。

[フォトダイオード用多チャンネル、ワイドレンジ信号読み出し回路開発]

フォトダイオードの電荷信号処理には、その読み出し回路もワイドレンジであることが求められる。このためには、回路ノイズレベルを下げ、最大レンジを大きくする必要があり。例えば、1 MIP を 1 fC で測定されるとき、

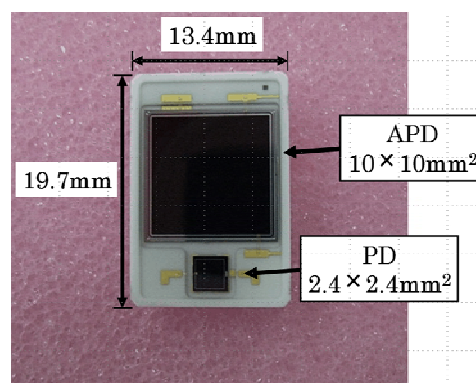


図 1 : APD/PD パッケージ。

浜松ホトニクス APD S8664-1010 と PD S1227-33BR が 1 つのセラミックに載せられている。APD/PD のゲイン比は約 1000 倍 (APD 増幅率 50 倍) である

ノイズレベルは 1 fC 以下であり、最大レンジは 1 nC 以上であることが求められる。このような 6 桁以上のダイナミックレンジをもつ電荷信号読み出し回路開発を行った。

3. 研究の方法

[光センサー]

結晶シンチレータの光センサーとして、APD と PD を 1 つのセラミックパッケージに実装したデュアルフォトダイオードが CALET グループによって開発された (図 1)。このセンサーの感度特性、暗電流ノイズ、温度特性、放射線耐性等をシステムティックに評価した。また各センサーについてシンチレータ光と荷電粒子に対する感度を比較するため CERN (スイス) の SPS ビームを用いた加速器実験を実施した。

[読み出し回路]

JAXA によって新たに開発された超低ノイズハイブリッド IC (HIC) のノイズ特性、温度特性、放射線耐性等を調べ、HIC と 2 段の波形整形回路を用いたワイドレンジ信号読み出しシステムと、PWO 結晶シンチレータ、デュアルフォトダイオードパッケージと合わせて用いた試験を実施した。

これとは別に、測定レンジをより広くした新しい専用 IC (ASIC) を新たに開発した。ASIC は最大 20 pC 程度までのレンジを保有するチャージアンプと各アンプについて 4 系統のゲインの異なる波形整形、サンプルホールド回路、ウィルキンソン型 ADC で構成され、台湾 UMC 社の 0.25 μm CMOS プロセスによって製作し、性能評価を行った (図 2)。

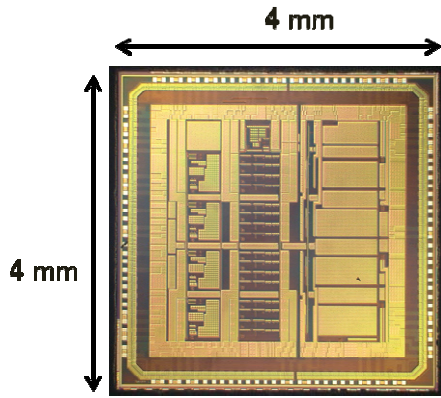


図2：本課題で新たに開発した光センサー用ワイドレンジアンプASIC。

4. 研究成果

1) デュアルフォトダイオードパッケージに荷電粒子が直接入射した場合、シンチレータ光測定でのバックグラウンドとなる。APD、PDの有感層の厚さはPIN-PDと比較して10分の1程度であり、モンテカルロシミュレーションによる計算を用いることによって補正可能であることが分かった(発表論文：4、学会等での発表16、17)。放射線耐性については、コバルト60照射施設において、暗電流の増加、ゲイン変動等を詳しく調べた。国際宇宙ステーションでの5年以内の使用では変動は補正可能な範囲であり、環境宇宙線観測によるエネルギーキャリブレーションによって観測には問題ない事が実証された。

2) 加速器ビームによる性能評価実験
CALET 全吸収型カロリメータ(TASC)の小型検出器を製作し、2010年9月、2011年9月にCERN-SPS 加速器において性能検証実験を行った。TASC 検出器は、ビーム入射方向に12層、横方向に3層、計36本のPbWO₄結晶シンチレータ(厚さ27r.l.)からなり、PMT、APD/PD 光センサーは実機とほぼ同じ部品、

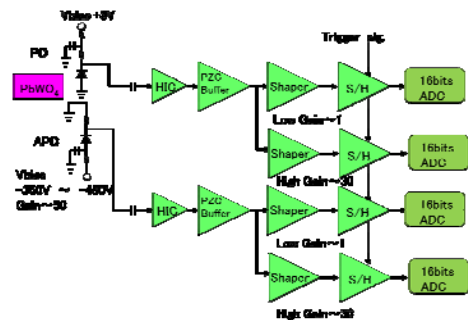


図3：CALETのAPD/PD読み出し回路のブロック図

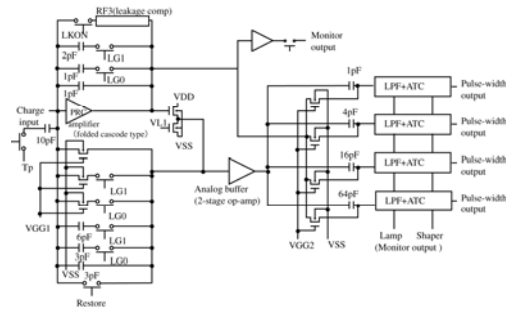


図4：WDAMP ASICのブロック図

構造のものを使用することによって現実的なモデル機を用いて、エネルギー 10GeV/c から350GeV/c までの電子、陽子シャワー発達、シャワーエネルギー決定精度等が調べられた。信号読み出しは、CALET 実験で使用するハイブリッドICとデュアルゲインアンプによる読み出しにより、約3000MIPsまでの粒子測定をするとともに、トリガー回路の試験を試みた。本実験により検出器と信号読み出し回路、トリガー回路の動作試験、ミュー粒子ビームを用いたエネルギー較正方法、シャワー発達、エネルギー分解能等を評価し、CALET装置の性能を明らかにした。これらの結果は宇宙線国際会議、学術論文で発表した(発表論文：4、5、学会、国際会議等での発表：2、3、4、9、10、16、17)。

3) ハイブリッドICを用いた読み出し回路
CALET 実験のAPD/PD読み出しに用いられるハイブリッドICを使ったワイドレンジ読み出し回路性能を調べた。センサーからの電荷信号は直後に取り付けられたフロントエンド回路(FEC)によって処理される。電荷信号はハイブリッドICにより積分され、APD/PDそれぞれについてゲインの異なる波形整形回路によって増幅される(図3)。CALET 実験と同様の回路を製作し評価した結果、APDのHighゲイン回路により0.5MIPsから測定でき、4系統の信号処理系によって10⁶MIPs以上までの観測が可能となることが分かった(発表論文：2、5、学会、国際会議等での発表：7、9、12、14)。

4) ワイドレンジASIC開発

将来の実験を見据えた、多チャンネル、低消費電力を実現するためのASIC(WDAMP: Wide Dynamic range AMPLifier)開発を行った。開発したASICは図4、図5のように、アナログ信号処理部である電荷増幅回路、波形整形回路とウィルキンソン型の波高パルス幅変換回路から構成されている。入力された電荷パルスは積分増幅回路によって電圧に変換される。フィードバックキャパシタはスイッチによ

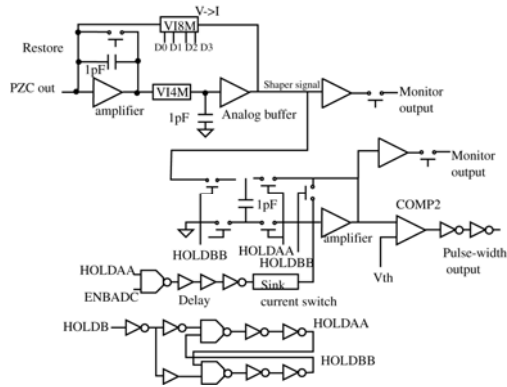


図5 : WDAMP 波形整形回路部、ADCブロック図

り、4pF, 8pF, 12pF, 16pFに切り替えることができる。積分増幅回路出力は4系統の波形整形回路に入力され、ゲイン比1:4:16:64でそれぞれ増幅される。従って、微小信号はゲインの大きな波形整形回路で、大信号は小さなゲインの回路で処理することにより4つを使い1fC以下から20 pC以上までの大きなダイナミックレンジを確保した(図6)。4つの波高値は外部トリガー信号によりサンプルホールドされ、入力電荷に比例した時間幅をもった矩形信号に変換さ、時間デジタルコンバータ(TDC)によってそれぞれデジタル化される。台湾UMC社の0.25 μm CMOSプロセスにより4チャンネル分の電荷増幅器回路を実装したASICを製作した。性能評価試験の結果、消費電力は約78mWで、リニアリティー、ノイズ、は予定通りの性能(測定レンジ1 fC以下から20 pC以上)を達成できることが分かった。本ASICの最終出力段にはウィルキンソン方式の電圧時間変換回路を搭載しているので、時間分解能5ns程度のTDCにより0.1fC以下の電荷測定が可能である。FPGAなどによるTDCを使用することで、多チャンネル読み出しシステムを容易に実現できる。これらの結果は国際会議、学術雑誌で発表した(発表論文:1,学会、国際会議での発表:1,5,11,13,14)。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計5件)

① Y. Katayose, H. Ikeda, M. Tanaka and M. Shibata, Development of Wide Range Charge Integration Application Specified

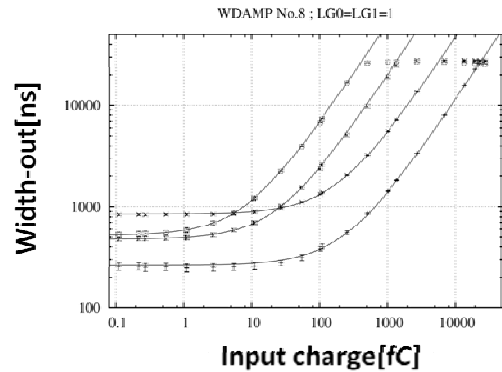


図6 : WDAMP ASIC のリニアリティー

Integrated Circuit for Photo-sensor
Nuclear Instruments and Methods in Physics
Research Section A, (2012), DOI:
10.1016/j.nima.2012.04.079 [掲載確定]
査読有り

② D. Ito, Y. Katayose, K. Mori, H. Murakami, S. Ozawa, Y. Shimizu, S. Torii, Y. Ueyama, R. Funahashi, High-dynamic range readout system using dual APD/PD for the CALET-TASC, Proceedings of the 32ND INTERNATIONAL COSMIC RAY CONFERENCE, BEIJING 2011, vol. 6, 368-371(2011) 査読無し

③ M. Karube, S. Torii, K. Kasahara, S. Ozawa, Y. Akaike, T. Aiba, Y. Ueyama, M. Nakamura, K. Yoshida, T. Tamura, S. Okuno, Y. Katayose, Y. Shimizu, Performance of the CALET Prototype: CERN Beam Test, Proceedings of the 32ND INTERNATIONAL COSMIC RAY CONFERENCE, BEIJING 2011, vol.6, 376-379(2011) 査読無し

④ Yusaku Katayose, Makio Shibata, Takayuki Asai, Masaki Go, Shoji Torii, Shunsuke Oazwa, Tadahisa Tamura, Kinya Hibino, Shoji Okuno, Hiroyuki Murakami, Yukio Uchihori, Hisashi Kitamura, Kenji Yoshidak and Shin Kubo, Development of a High Dynamic Range Front-End Electronics for the Total Absorption Calorimeter of CALET, Proceedings of 31st International Cosmic Ray Conference, (2009)http://icrc2009.uni.lodz.pl/proc/html/index.php_id=2.html#K 査読無し

⑤ Y. KATAYOSE, M. SHIBATA, S. TORII, Y. SHIMIZU, T. TAMURA, K. HIBINO, S. OKUNO, K. YOSHIDA4, H. KITAMURA, Y. UCHIHORI, H. MURAKAMI, S. KUBO, Development of a High

Dynamic Range Read-out System using Multiple Photodiodes for the Total Absorption Calorimeter of the CALorimetric Electron Telescope, J. Phys. Soc. Jpn. 78 (2009) Suppl. A, pp. 177-180 査読有り

[学会発表] (計 17 件)

- ① 片寄祐作、池田博一、田中真伸、柴田槇雄、宇宙線観測のための光センサ読み出し用ワイドレンジアンプ ASIC の開発、日本物理学会、2012 年 3 月 24 日、関西学院大学
- ② 吉田圭佑、片寄祐作 他、CERN-SPS による CALET-TASC プロトタイプ性能実証試験 日本物理学会、2012 年 3 月 24 日、関西学院大学
- ③ 二宮翔太、片寄祐作 他、CALET-TASC に用いる PWO の発光特性に関する研究、日本物理学会、2012 年 3 月 24 日、関西学院大学
- ④ 赤池陽水、片寄祐作 他、CERN-SPS ビームによる CALET-TASC 検出器の性能検証、第 12 回宇宙科学シンポジウム、2012 年 1 月 5 日、宇宙科学研究所
- ⑤ 片寄祐作、池田博一、田中真伸、柴田槇雄、Development of Wide Range Charge Integration Application Specified Integrated Circuit for Photo-sensor, 8th International "Hiroshima" Symposium on the Development and Application of Semiconductor Tracking Detectors, 2011 年 12 月 5 日、Academia Sinica (台北、台湾)
- ⑥ 二宮翔太、片寄祐作 他、加速器ビームによる CALET-TASC 用 PWO の光量測定、日本物理学会、2011 年 9 月 16 日、弘前大学
- ⑦ 伊藤大二郎、片寄祐作 他、CALET-TASC の APD/PD 用前置回路、日本物理学会 第 66 回年大会、2011 年 3 月 26 日、新潟大学
- ⑧ 赤池陽水、片寄祐作 他、CALET のための CERN-SPS ビーム実験報告、日本物理学会 第 66 回年大会、2011 年 3 月 26 日、新潟大学
- ⑨ 片寄祐作 他、WDAMP: Wide Dynamic range Amplifier ASIC 開発、オープンソースコンソーシアム ワークショップ、2011 年 2 月 1 日、長崎総合科学大学
- ⑩ 片寄祐作 他、CALET: 全吸収型カロリメータ (TASC) 読み出しシステム、宇宙科学シンポジウム、2011 年 1 月 7 日、宇宙科学研

究所

- ⑪ 清水雄輝、片寄祐作 他、CALET 全吸収カロリメータに用いる PD/APD システムの開発、日本物理学会 2010 年秋季大会、2010 年 9 月 13 日、九州工業大学
- ⑫ 伊藤大二郎、片寄祐作 他、CALET-全吸収型カロリメータの読み出しシステム開発、日本物理学会 2010 年秋季大会、2010 年 9 月 11 日、九州工業大学
- ⑬ 片寄祐作 他、ワイドダイナミックレンジアンプの開発、オープンソースコンソーシアム ワークショップ、2010 年 7 月 1 日、高エネルギー加速器研究機構
- ⑭ 相場俊英、片寄祐作 他、PD, APD を用いた PWO によるシャワー検出性能のビーム実験、日本物理学会 第 65 回年大会、2010 年 3 月 22 日、岡山大学
- ⑮ 浅井孝行、片寄祐作、柴田槇雄 他、飛翔体実験での光センサ読み出しのためのワイドダイナミックレンジ フロントエンド LSI 開発、日本物理学会 2009 年秋季大会、2009 年 9 月 13 日、甲南大学
- ⑯ 相場俊英、片寄祐作 他、CERN-SPS ビームによる CALET コンポーネントの性能評価、日本物理学会 2009 年秋季大会、2009 年 9 月 13 日、甲南大学
- ⑰ 片寄祐作 他、Development of a High Dynamic Range Front-End Electronics for the Total Absorption Calorimeter of CALET, 31st International Cosmic Ray Conference, 2009 年 7 月 7 日、ポーランド ウーチ大学

[その他]
ホームページ等

オープンソースコンソーシアム WDAMP プロジェクト
<http://openit.kek.jp/project/wdamp/public/wdamp>

6. 研究組織
- (1) 研究代表者
片寄 祐作 (KATAYOSE YUSAKU)
横浜国立大学・工学研究院・准教授
研究者番号: 90323930
- (2) 研究分担者
柴田 槇雄 (SHIBATA MAKIO)

横浜国立大学・工学研究院・教授
研究者番号：50018016

(3) 連携研究者 ()

研究者番号：
該当なし